

混凝土泛碱机理分析

Analysis on the Mechanism of Concrete Alkali Leaching

柏延平¹, 马 雷¹, 汪佐浩¹, 李 瑞¹, 雒亿平²

(1. 国网甘肃省电力公司临夏供电公司, 临夏 731100;
2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为解决西北水利工程混凝土泛碱问题, 通过干湿循环法开展加速泛碱试验, 结合 XRD、SEM、TG-DTG 和¹H NMR 等多种微观检测技术, 系统探究了泛碱现象的物质组成、微观特征、分布传输规律及孔隙结构演变机理。结果表明: 混凝土泛碱主要产物有 CaCO₃、Na₂SO₄、SiO₂ 和 K₃Na (SO₄)₂ 等化合物以及其他少量盐类; 经加速泛碱处理后, 试件在 200~500 °C 内的质量损失显著增加, Ca (OH)₂ 含量明显高于标准养护试件, 且在 0~2 与 8~10 mm 深度区间内出现富集; 加速泛碱试件的小孔占比变化较小, 中孔占比降低 77.99%, 大孔占比增加 19.75%, 同时微裂缝占比提升 10.27%, 表明泛碱作用会导致混凝土孔隙率增大、孔隙分布劣化。研究成果为水利工程防护提供理论依据。

关键词: 混凝土; 泛碱性能; 微观结构

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0029-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.006

BAI Yanping¹, MA Lei¹, WANG Zuohao¹, LI Rui¹, LUO Yiping²

(1. State Grid Gansu Linxia Power Supply Company, Linxia 731100, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To investigate the efflorescence mechanism of concrete in water conservancy projects in Northwest China, accelerated tests were conducted using a wet-dry cycling method. The study comprehensively characterized the efflorescence phenomenon through multiple micro-analytical techniques, including X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetry-derivative thermogravimetry (TG-DTG), and proton nuclear magnetic resonance (¹H NMR). Key findings are as follows: The main efflorescence products were identified as CaCO₃, Na₂SO₄, SiO₂, K₃Na (SO₄)₂, and minor salts; After accelerated efflorescence treatment, concrete specimens showed significantly greater mass loss in the range of 200-500 °C and higher Ca (OH)₂ content compared to standard-cured specimens, with notable enrichment at depths of 0-2 and 8-10 mm; Efflorescence coarsened the pore structure; the proportion of mesopores decreased by 77.99%, while those of macropores and microcracks increased by 19.75% and 10.27%, respectively, with little change in micropore content. These results demonstrate that efflorescence increases concrete porosity and degrades the pore-size distribution, thereby adversely

基金项目: 西北旱区生态水利国家重点实验室开放课题 (XB15468)。

作者简介: 柏延平 (1994—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水工混凝土新材料。

通信作者: 雒亿平 (1984—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水工混凝土新材料。

收稿日期: 2025-03-10

材料科学

affecting the compactness and durability of the material. The research results provide a theoretical basis for the protection of water conservancy projects.

Key words: concrete; efflorescence performance; microstructure

0 引言

混凝土泛碱作为工程实践中常见的质量问题,不仅影响建筑物的外观美观,更在一定程度上威胁着结构的耐久性与安全性^[1]。随着绿色建材的广泛应用,特别是碱激发矿渣混凝土和钢渣混凝土等高碱性材料的推广,泛碱问题愈发显著,成为制约低碳混凝土工程应用的关键瓶颈^[2-3]。深入研究泛碱的物理化学机理,揭示水分迁移、溶质扩散及化学反应的微观过程,有助于优化混凝土配合比、开发抑制泛碱的技术,为提升工程耐久性提供科学依据^[4]。

国内外学者对混凝土泛碱机理进行了深入研究,包括泛碱的形成原因、影响泛碱的因素、主要泛碱物质种类和泛碱的抑制方法等方面。Dow 等^[5]详细解释了泛碱形成过程,并建立了一个物理化学模型来解释和量化其形成的关键特征。Van Enckevort 等^[6]研究了饱和盐溶液中结晶生成过程,发现结晶速率遵循 Fick 定律,晶体的大小、形状和蠕变速率有着重要的联系。Pel 等^[7]采用核磁共振技术分析氯化钠黏土砖表面干燥过程的演化规律,并通过绘制泛碱路径图,表征水分和氯化钠的分布特征。

国内外学者也从多个角度对混凝土泛碱过程进行了研究,Zhang 等^[8]采用一种改进的吸水试验评估了含水且碳酸化铺路砖上的泛碱现象,确定泛碱产物为结晶状硫酸钾的盐类沉积物。曹天骥^[9]系统研究了水泥基外墙系统的泛碱过程,认为泛碱物质主要来源于 B 层结构的 Ca (OH)₂,并根据泛碱机理建立了泛碱物理模型。李朗等^[10]利用 Image - pro plus 图像处理软件定量评价了水泥试块的泛碱程度,证实 MgCl₂溶液和 AlCl₃溶液均对水泥泛碱有较好的抑制作用。

影响混凝土材料泛碱的因素很多,其中,环境温湿度对泛碱程度影响最大,风速对泛碱程度影响较小^[11]。Ordóñez 等^[12]对埃尔切旧桥开展了长达 9 年的追踪,发现大气相对湿度的昼夜变化以及某些盐类矿物(硝酸盐和氯化物)的低吸湿相对湿度值,

对泛碱产物的垂直分布起着重要作用。王培铭等^[13]通过试验研究了 5 种不同的加速饰面砂浆泛碱的方法,结果表明温度、湿度和风对饰面砂浆泛碱影响程度在不同的时间影响作用不同。路林海等^[14]根据工程冬季施工及泛碱情况,提出混凝土泛碱受到原材料、施工质量和养护方式等多种因素影响。

综合现有研究成果,可明确混凝土泛碱需满足可溶性盐、水分、连通孔隙、干湿或温度交变环境及温湿度或压力梯度 5 个条件。为阐明混凝土泛碱的形成机理,采用干湿循环法进行加速泛碱处理,并结合 XRD、SEM、同步热分析(TG-DTG)和核磁共振(¹H NMR)等多种微观检测技术,系统研究泛碱现象的物质成分、微观形貌、分布与传输规律以及孔隙结构演变,旨在从多尺度关联视角揭示其泛碱机制,为工程防护提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,其成分性能见表 1。骨料分细骨料和粗骨料,细骨料为天然河砂,中砂,细度模数为 2.87,表观密度为 2 666 kg/m³;粗骨料是 5~31 mm 连续粒径级配的天然碎石,表观密度为 2 750 kg/m³,骨料级配曲线如图 1 所示,骨料筛分结果见表 2。

表 1 水泥主要化学成分和性能指标
Table 1 Main chemical composition and performance indexes of cement

主要化学成分/%			抗压强度 /MPa		凝结时间 /min		密度 /(g/cm ³)	安定性
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	3 d	28 d	初凝	终凝		
58.57	23.73	5.35	22.3	51.7	205	276	3.16	合格

1.2 试验方法

首先制备 100mm×100mm×100 mm 立方体的 C30 混凝土试件,在 (20±2)℃、相对湿度 95% 的条件下养护,待达到设计龄期后开展试验,包括加速泛碱试验、X 射线衍射仪测试、扫描电镜测试、核磁共振氢谱测试及同步热分析测试,所有试验严格遵循既定方法与流程进行。

表2 筛分试验结果
Table 2 Results of sieve test

骨料种类	筛孔尺寸 /mm	上限 /%	下限 /%	分级筛余 /%	累计筛余 /%
砂	4.75	10.0	0.0	3.0	3.0
	2.36	25.0	0.0	10.0	13.0
	1.18	50.0	10.0	19.0	32.0
	0.60	70.0	41.0	29.0	61.0
	0.30	92.0	70.0	25.0	86.0
	0.15	100.0	90.0	12.0	98.0
碎石	31.5	5.0	0.0	2.0	2.0
	25.0	10.0	5.0	7.0	9.0
	20.0	45.0	15.0	28.0	37.0
	16.0	70.0	30.0	27.0	64.0
	10.0	90.0	70.0	18.0	82.0
	5.0	100.0	90.0	11.0	93.0
	2.5	100.0	95.0	5.0	98.0

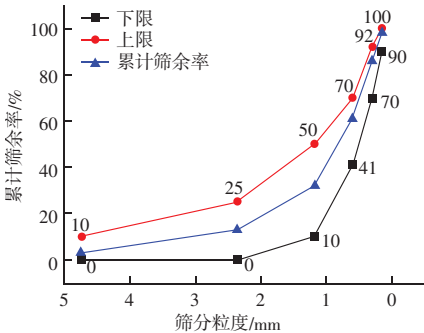


图1 骨料级配曲线
Fig. 1 Aggregate gradation curve

1.2.1 快速泛碱试验方法

采用干湿循环方法加速混凝土试件的泛碱过程。将成型1 d后的混凝土试件侧面用塑料膜密封，并浸泡于NaHCO₃与CaCl₂配制的饱和混合溶液，持续10 h。随后，将试件置于50℃烘箱中干燥6 h，冷却至室温即完成1个循环，后续进行14 d标准养护。在处理完成后，用刷子刷取试件表面的泛碱物质进行检测。

1.2.2 泛碱程度表征方法

采用日本理学SmartLabSEX射线衍射仪鉴定混凝土表面泛碱物质成分。测试前，将试件置于105℃烘箱中干燥24 h，以去除样品中的水分；扫描过程采用10°/min的扫描速度，以0.02°步长在5°~90°范围内进行。

采用PHenomXL台式扫描电镜观察混凝土泛碱表面，分析混凝土水化产物及微观形貌的变化特征。

采用STA2500TG-DSC同步热分析仪进行热重

分析，通过测试过程中的质量变化表征主要泛碱物质的含量。试验前，将样品置于60℃下干燥6 h，经75 μm筛筛分后，取约10 mg样品装入氧化铝坩埚中进行测试；仪器加热温度范围为50~1 000℃，升温速率为20℃/min，氮气流量为60 mL/min。

采用MesoMR23-060H-1核磁共振仪测试混凝土试件的孔隙结构。测试前，将达到28 d养护龄期的试件置于混凝土真空饱水机中饱水24 h，随后进行孔隙结构测试。

2 混凝土泛碱机理分析

2.1 混凝土泛碱物质成分分析

图2为混凝土试件表面泛碱物质XRD衍射图谱。混凝土表面泛碱主要产物包括CaCO₃、Na₂SO₄、SiO₂、K₃Na(SO₄)₂及其他少量盐类。各主要产物的形成机制与来源如下：CaCO₃主要来源于混凝土中水泥水化副产物Ca(OH)₂与空气中CO₂发生碳化反应；检测出的SiO₂并非泛碱直接产物，推测是取样过程中泛碱产物裹挟了混凝土基体的骨料碎屑，从而引入了骨料所固有的SiO₂晶体；Na₂SO₄的生成机制为水泥中的碱性氧化物Na₂O在水化过程中与水反应生成NaOH，继而与水泥中或环境中的硫酸盐离子反应形成。

泛碱物质的氧化物含量见表3。泛碱物质中Na、Si、S、K、Ca等元素含量较高，总占比超过80%。元素分布特征与XRD物相定性分析结果相互吻合，进一步证实了泛碱物质中主要特征元素的种类及含量。

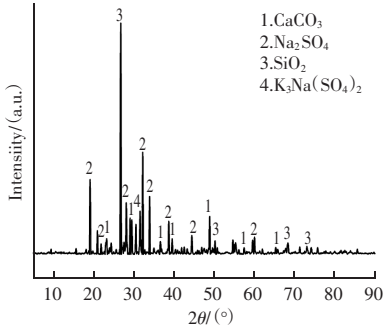


图2 混凝土泛碱物质的XRD图谱
Fig. 2 XRD pattern of concrete specimen surfaces

表3 泛碱物质成分中氧化物种类及含量
Table 3 Type and contents of oxides in pan-alkali substances/%

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	CaO	其他
18.88	0.38	4.02	24.69	1.09	22.59	9.07	12.93	6.35

材料科学

如图3所示,混凝土表面泛碱产物的微观形貌、结构及分布特征清晰呈现。图中可见泛碱物质多呈白色或浅色晶体、颗粒或片状,其具体形貌因物相组成而异。图3(a)显示泛碱晶体以聚集、堆积或分散等方式分布于混凝土表面,直接反映了其在界面区域的赋存状态与分布规律。进一步观察图3(c),

可见大量菱形晶体,此为方解石的典型形貌,印证了XRD物相分析中 CaCO_3 为主要产物的结论。SEM观测结果与XRD物相鉴定及元素分析结果高度一致,证实泛碱产物在形貌、结构与组成上的系统性特征,为揭示其形成与分布机制提供了微观依据。

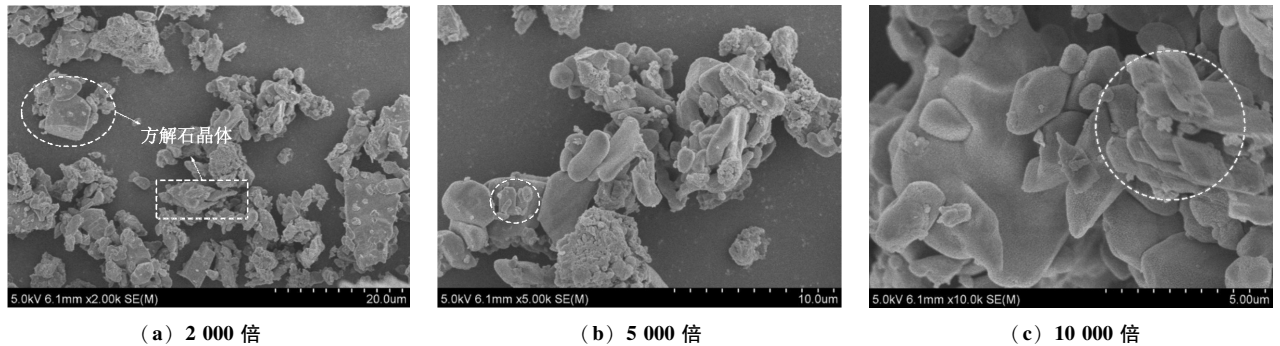


图3 混凝土泛碱物质的SEM图片
Fig.3 SEM picture of concrete alkali-containing substances

2.2 混凝土泛碱物质分布剖析

试验中的取样位置如图4所示,沿着试件中心自底向上每2mm取样一次,共取得5个样本。

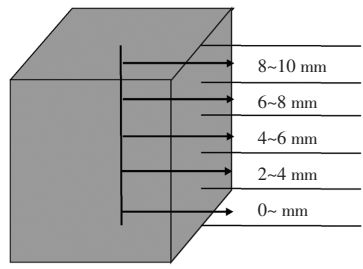
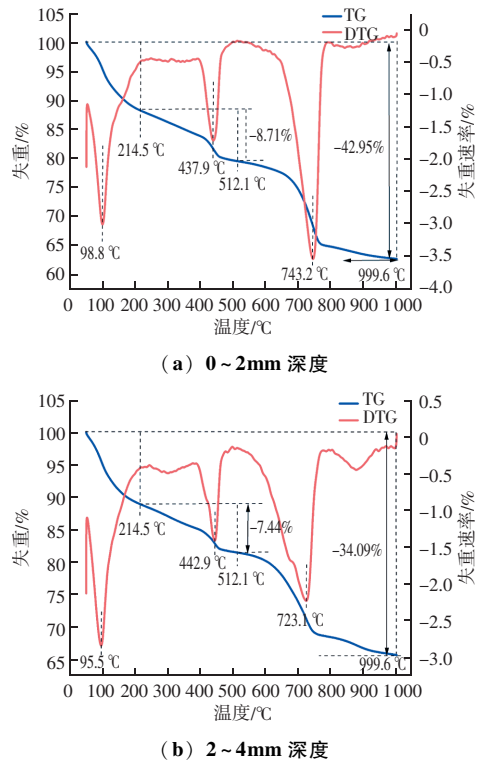


图4 混凝土试件取样位置图
Fig.4 Sampling position diagram of concrete specimens

混凝土中的泛碱物质主要源自水泥基质内游离 CaO 水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。该物质进一步与空气中的 CO_2 和 H_2O 发生反应,从而形成泛碱产物。因此,混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量越高,泛碱物质的生成量也相应增加。1g的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以分解成0.757g的 CaO 和0.243g的 H_2O 。因此可以根据热重曲线中的失重计算得到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量。

图5为加速泛碱后混凝土不同深度样品的TG与DTG曲线。在200~500℃温度区间的质量损失主要源于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的脱水反应。该温度范围内,深度为0~2、2~4、4~6、6~8、8~10mm的样品质量损失分别为8.71%、7.44%、7.61%、7.47%、10.12%,

计算可得 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量分别为35.84%、30.62%、31.32%、30.74%、41.65%。试验结果表明,经加速泛碱处理后,混凝土在0~2与8~10mm深度范围内的质量损失及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较高,其余深度区间的数值相对较低且彼此接近。



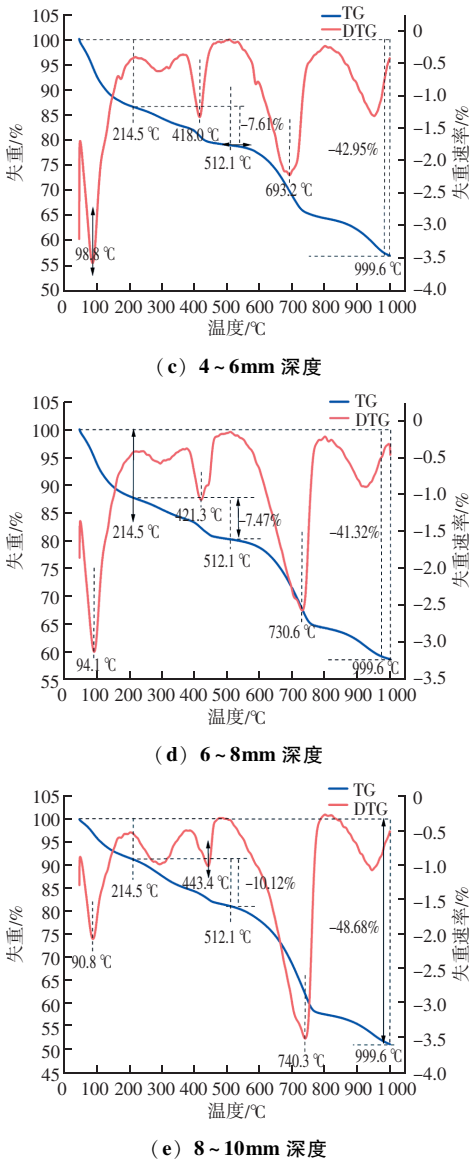


图5 不同深度混凝土样品的TG和DTG曲线
Fig.5 TG and DTG curves of concrete samples at different depths

2.3 混凝土泛碱物质传输过程

图6(a)显示了标准养护后混凝土试件各深度样品的TG曲线，对应的质量损失与Ca(OH)₂含量见表4。在200~500℃温度区间内，深度为0~2、2~4、4~6、6~8、8~10mm的质量损失分别为4.19%、3.37%、4.22%、3.77%、3.47%，计算得到的Ca(OH)₂含量分别为17.24%、13.87%、17.36%、15.51%、14.28%，显著低于同条件下加速泛碱处理的试件，且各深度间存在一定差异。加速泛碱后0~2mm的Ca(OH)₂含量明显偏高，这可能归因于盐碱水分侵蚀导致的物质堆积。而在中间

深度范围内，随着传输距离增加，泛碱物质传输量逐渐减小，其含量变化趋于平缓。8~10mm的深度范围内再次观察到较高的Ca(OH)₂含量，这是由于泛碱物质向表层迁移过程中受环境碳化与温湿度变化影响后的再次富集。上述分布特征反映了泛碱过程中物质的迁移与累积机制，同时也体现了外部环境对混凝土组成的影响。

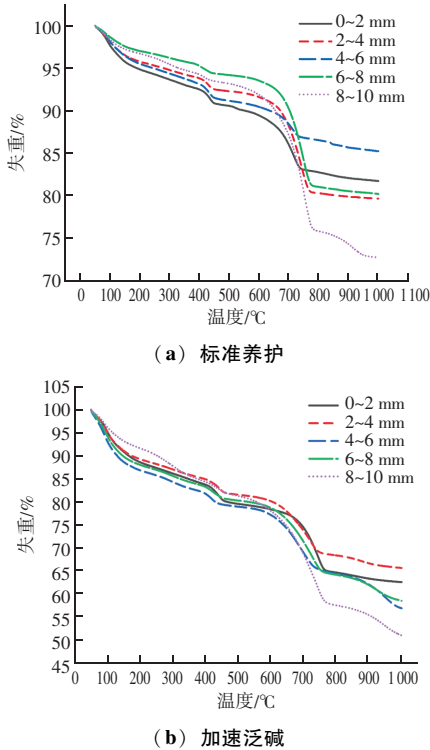


图6 不同养护条件下混凝土试件的TG曲线
Fig.6 TG curves of samples of concrete specimens under different curing conditions

表4 不同养护条件下混凝土试件的质量损失和Ca(OH)₂含量
Table 4 Mass loss and Ca(OH)₂ content of concrete specimens under different curing conditions

深度 /mm	标准养护试件		泛碱试件	
	质量损失 /%	Ca(OH) ₂ 含量/%	质量损失 /%	Ca(OH) ₂ 含量/%
0~2	4.19	17.24	8.71	35.84
2~4	3.37	13.87	7.44	30.62
4~6	4.22	17.36	7.61	31.32
6~8	3.77	15.51	7.47	30.74
8~10	3.47	14.28	10.12	41.65

2.4 混凝土泛碱孔隙结构研究

图7为混凝土试件的T₂谱分布曲线。整体上看，所有T₂谱均由小孔($r<10\text{ nm}$)、中孔($10\text{ nm}\leq r<50\text{ nm}$)、大孔($50\text{ nm}\leq r<1\text{ 000 nm}$)和微裂缝($r\geq 1\text{ 000 nm}$)对应的信号峰组成，且各谱线幅值

材料科学

随弛豫时间延长而逐渐降低。第一个峰（对应小孔）的幅值最高点位于 $T_2 = 1\text{ ms}$ 附近，第二个峰（对应中孔）位于 $T_2 = 20\text{ ms}$ 附近，第三个峰（对应大孔及微裂缝）位于 $T_2 = 400\text{ ms}$ 附近。在泛碱环境中，盐碱物质随水分向混凝土表面迁移，不仅会促使原有微小孔隙扩展，还可能因结晶压力与化学侵蚀作用形成更粗大的孔隙，从而改变材料的孔隙结构。

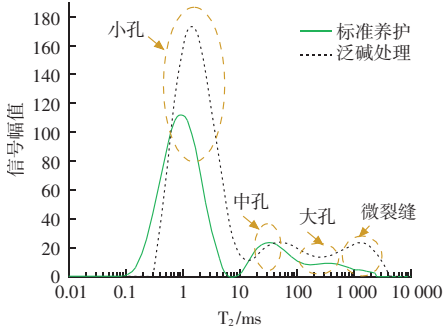


图7 混凝土试件 T_2 谱图

Fig. 7 T_2 spectrum of concrete specimens

图8为混凝土试件的孔隙分布情况。计算结果表明，小孔所占比例在两种养护条件下变化不显著。在标准养护试件中，中孔、大孔与微裂缝的占比分别为 17.99%、60.29% 和 21.62%；而经泛碱处理后，三者占比分别为 3.96%、72.20% 和 23.84%。对比可见，泛碱处理导致中孔比例降低 77.99%，大孔与微裂缝比例分别增加 19.75% 和 10.27%，反映出混凝土内部孔隙结构发生了粗化。这一变化表明，泛碱作用促使混凝土内部孔隙数量增多，平均孔径增大，降低了材料的致密性。大孔与微裂缝的增加会直接影响混凝土的抗渗透性能与力学强度。尤其在外部侵蚀环境下，粗大孔隙更易成为水分及有害离子迁移的通道，从而加速混凝土性能的退化。

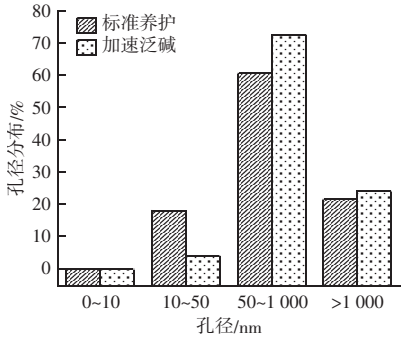


图8 标准养护和加速泛碱混凝土的孔隙分布图

Fig. 8 Pore distribution diagram of standard curing and accelerated pan-alkali concrete

3 结论

为阐明混凝土泛碱的形成机理，采用干湿循环法对试件进行加速泛碱处理，结合 XRD、SEM、TG-DTG 和 ^1H NMR 等多种微观分析手段，系统研究了泛碱现象的外观形貌、物质成分、分布与传输规律以及孔隙结构演变，得到以下主要结论：

(1) XRD 与 SEM 分析表明，混凝土泛碱产物以 CaCO_3 、 Na_2SO_4 、 SiO_2 和 $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ 等盐类为主，微观形貌呈现聚集、堆积及典型菱形方解石晶体的特征。

(2) TG-DTG 测试结果显示，加速泛碱试件在 $200\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 区间的质量损失及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量显著高于标准养护试件，且深度 $0\sim 2$ 和 $8\sim 10\text{ mm}$ 出现明显富集，反映泛碱物质在迁移过程中存在明显的界面堆积效应。

(3) ^1H NMR 孔隙结构分析表明，加速泛碱处理后混凝土内部孔隙结构趋于粗化：中孔比例大幅下降，大孔与微裂缝比例分别增加约 19.75% 与 10.27%，说明泛碱作用不仅增大孔隙率，而且劣化孔隙分布，进而影响混凝土的密实性、抗渗性与耐久性。

参 考 文 献

[1] ZHANG Z, PROVIS J L, MA X, et al. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers [J]. Cement and concrete composites, 2018, 92: 165-177.

[2] YANG Z, XUE N, XU L, et al. Evaluation of the efflorescence resistance of calcium sulfoaluminate cement mortar: from indoor accelerated testing to outdoor exposure [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 2447-2461.

[3] 宋永远, 周文娟, 赵依琳. 修补用碱激发材料的泛碱抑制研究 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (6): 2499-2510.

[4] 阳晰琦. 论建筑物墙面泛碱现象的预防与处理 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35 (2): 60-62.

[5] DOW C, GLASSER F P. Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33 (1): 147-154.

[6] VAN ENCKEVORT W J P, LOS J H. On the creeping of saturated salt solutions [J]. Crystal growth & design, 2013, 13 (5): 1838-1848.

[7] PEL L, HUININK H, KOPINGA K, et al. Efflorescence pathway diagram: understanding salt weathering [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18 (5): 309-313.

定这 5 个阶段。其中, 通过后沉降 (第四阶段) 最大, 开挖沉降 (第二阶段) 次之。

(3) 针对不同阶段的变形原因, 可以采取配置高质量泥浆、控制掘进姿态、盾构外侧空隙注入“克泥效”材料等变形控制措施。

参 考 文 献

- [1] 刘成虎. 岩溶地区地铁盾构下穿高铁框架涵关键技术研究 [J]. 交通世界, 2023 (21): 158-160.
- [2] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2010, 44 (10): 1962-1966, 2004.
- [3] 魏纲, 蔡浩然, 齐永洁, 等. 盾构下穿引起围压改变对既有盾构隧道的影响研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2025, 45 (4): 708.
- [4] 杨超, 刘远明, 刘凯, 等. 贵阳地铁盾构隧道下穿高速铁路沉降规律 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (5): 2100-2110.
- [5] 欧阳鸿志, 朱定桂, 安斌, 等. 富水砂层盾构隧道下穿独立浅基础铁路桥加固方案比选研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (5): 246-253.
- [6] 王继峰, 刺宝成, 孟祥丰, 等. 盾构隧道下穿铁路框架桥施工变形规律及控制措施 [J]. 公路, 2022, 67 (3): 373-377.
- [7] 张亚洲, 林志宇, 马凝宇, 等. 砂卵石地层盾构隧道下穿施工对既有铁路框架桥的影响 [J]. 四川建筑, 2021, 41 (6): 101-104.
- [8] 许有俊, 孟贞, 李志成, 等. 盾构隧道近距下穿既有地铁车站沉降控制措施研究 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2018, 49 (6): 1044-1050.
- [9] 姚晓明, 舒波, 李波. 新建盾构隧道近距离下穿既有地铁线的安全控制技术 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (5): 243-250.
- [10] 江华, 张晋勋, 江玉生, 等. 新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征研究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53 (1): 159-164, 172.
- [11] 房倩, 杜建明, 李建业, 等. 大直径盾构隧道紧邻下穿既有地铁施工诱发地层沉降特征分析 (英文) [J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (3): 882-897.
- [12] 施成华, 郑晓悦, 王祖贤, 等. 考虑地层变异性的新建隧道下穿引起既有盾构隧道纵向变形的随机分析方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (2): 500-512.
- [13] 范文昊, 谢盛昊, 周飞聪, 等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区及控制措施案例研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (4): 43-57.
- [14] 江杰, 龙逸航, 邢轩伟, 等. 富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (7): 1828-1836.
- [15] 崔光耀, 麻建飞, 宁茂权, 等. 超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工加固方案对比分析 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (增刊2): 414-424.

(上接第 34 页)

- [8] ZHANG S, GHOULEH Z, SHAO Y. Effect of carbonation curing on efflorescence formation in concrete paver blocks [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (6): 04020127.
- [9] 曹天骥. 水泥基外墙系统泛碱预测模型与抑制方法 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 李朗, 张玉玮, 高育慧, 等. 新型泛碱抑制剂的制备及应用 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52 (1): 97-101.
- [11] VOSS K, 刘畅, 杜建东. 混凝土路面砖的变色现象 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2010 (6): 18-22.
- [12] ORDÓÑEZ S, LA IGLESIA Á, LOUIS M, et al. Mineralogical evolution of salt over nine years, after removal of efflorescence and saline crusts from Elche's Old Bridge (Spain) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 343-354.
- [13] 王培铭, 寿梦婕. 高温条件下不同养护湿度对聚合物改性水泥砂浆拉伸粘结强度的影响 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (1): 54-58.
- [14] 路林海, 周立民, 刘家海, 等. 轨道交通高架桥墩冬季施工混凝土泛碱机理分析 [J]. 中外公路, 2019, 39 (6): 73-76.

(上接第 40 页)

- [10] 王宇杰, 杜红秀. 流态固化土的电化学特性及其施工与力学性能 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (6): 2535-2541.
- [11] 梁仕华, 陈俊涛, 林焕生, 等. 水泥固化淤泥废弃土作为填土材料的试验研究 [J]. 广东工业大学学报, 2020, 37 (2): 102-106.
- [12] 张会丽, 霍光. 改性流态固化土抗压性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 89-93, 112.
- [13] 侯运炳, 丁鹏初, 韩冬, 等. 冻融循环对全尾砂固结体强度与微观结构的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2019, 39 (8): 68-73.
- [14] 胡贵泉. 冻融作用下赤泥-水泥复合土疲劳特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [15] 丁智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (11): 2328-2336.